Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics,34, 2022. (1-18)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Improving Gas Flow Distribution in a PEMFC Stack by Removing Liquid Water from the Manifold

Research Article

Ahmad Rezaei Sangtabi[1], Ali Kianifar[2], Ebrahim Alizadeh[3].

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76562.1118

1. Introduction

The output voltage of a polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell is in the range of 1V. Several fuel cells are connected in series to achieve the applicable voltage and form a fuel cell stack. The output voltage of the stack is equal to the sum of the output voltages of individual fuel cells. Ideally, all fuel cells in the stack should have the same voltage, which requires equal flow distribution among the cells. Gas is distributed between the fuel cells through the manifold in the stack. A small amount of flow maldistribution in the stack is common, and with the increase in the number of cells in the stack, the severity of the maldistribution increases. Flow maldistribution can cause the cells to be flooded and create a variable temperature in the stack, which results in a decrease in the voltage of the cells.

The researchers have presented methods to reduce the flow maldistribution in the stack. In experimental and numerical studies, the flow inside the manifold has been investigated as a single phase. Proton conductivity of a fuel cell membrane improves with increasing humidity. In order to increase the efficiency of the stack, the relative humidity of the reaction gases before entering the stack is often increased. In this research, the effect of water vapor condensation in the manifold on the flow distribution was investigated and a method is proposed to improve the gas flow distribution

2. Computational domain

Figure 1 illustrates the computational domain. The cathode section of the stack includes 6 integrated humidifiers, an inlet manifold, 52 fuel cells, and an outlet manifold. One way of improving flow distribution is gradually reducing the height of the manifold. The height of end wall of the manifold is represented by H. The simulation is done with two rectangular (H=10) and trapezoidal (H=3) manifolds to see the effects of reducing the height of the manifold on the single-phase and two-phase flow distributions.

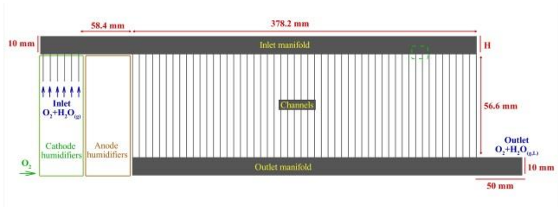


Figure 1. Computational domain

3. Results

Figure 2 shows the gas flow distribution between the stack cells obtained from the single-phase simulation with two different manifolds. The gradual reduction of the height of the manifold improved the flow distribution in the stack.

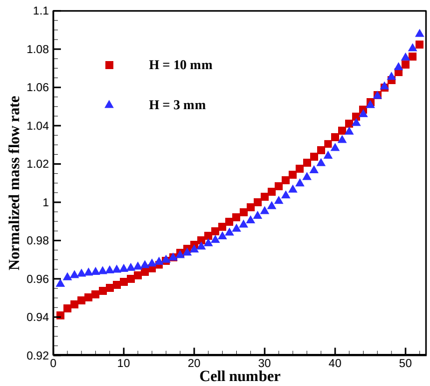


Figure 2. Gas flow distribution in fuel cell stack with single phase simulation

The heat transfer of the stack with the surrounding environment reduces the temperature of the gas inside the manifold. The saturation pressure of water vapor changes with the temperature, and decreasing the gas temperature causes water vapor to condense. The mass rate of phase change can be calculated from the following equation:

*Manuscript received: 7 May 2022, Revised, 30 May 2022, Accepted, 19 July 2022.

[1]. PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[2]. Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email**: a-kiani@um.ac.ir

[۳]. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{k_{cond}(1-\alpha_1)M_g^{H_2O}}{\bar{R}T} P(x_g^{H_2O} - x_{sat}^{H_2O}) & x_g^{H_2O} \geq x_{sat}^{H_2O} \\ k_{evap}\alpha_1\rho_1 P(x_g^{H_2O} - x_{sat}^{H_2O}) & x_g^{H_2O} < x_{sat}^{H_2O} \end{cases} \quad (1)$$

The temperature changes in the manifold are small and the phase change occurs slowly. Small water droplets are formed on the upper wall of the manifold and are pushed towards the end of the manifold by the force of the gas flow. Figure 3 shows that a larger droplet is formed at the end of the manifold by gathering small droplets.

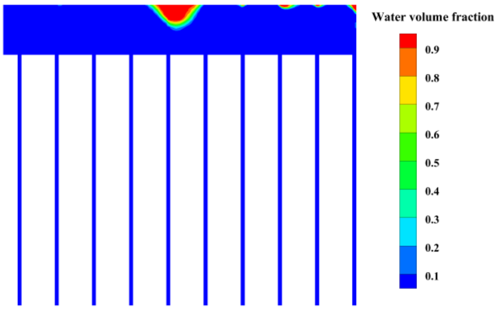


Figure 3. Contour of volume fraction of water at *t*=50.2s

By gathering smaller droplets, the radius of the bigger droplet increases, and due to the force of weight, it is separated from the upper wall and enters the cells. Figure 4 shows the entrance of water into the end cells.

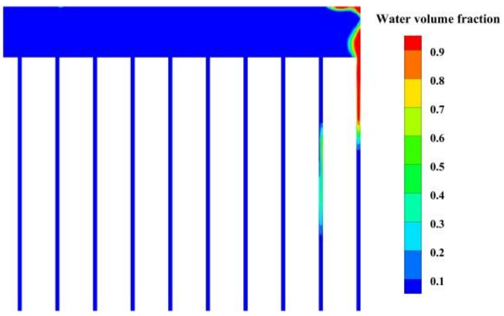


Figure 4. Contour of volume fraction of water at t=50.5s

With the gradual decrease in the height of the manifold, in addition to the gas flow force, the weight force also pushes the water drop towards the end of the manifold. As a result, liquid water enters the end cell with a smaller amount and at shorter time intervals. It was suggested to consider a chamber at the end of the manifold to collect liquid water. Figure 5 illustrates the proposed scheme.

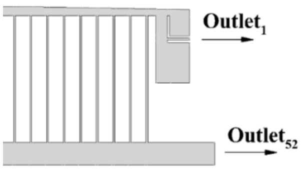


Figure 5. Suggested geometry for the end part of the manifold in order to remove liquid water from the manifold

In the proposed geometry, some gas is discharged from the water collection chamber and helps to transfer liquid water into the chamber. Figure 6 shows that liquid water is collected from the manifold and transferred into the chamber. The two-phase simulation results showed that with the proposed method, liquid water do not penetrate the cells of the stack, and the gas flow distribution in the stack will be according to the single-phase simulation.

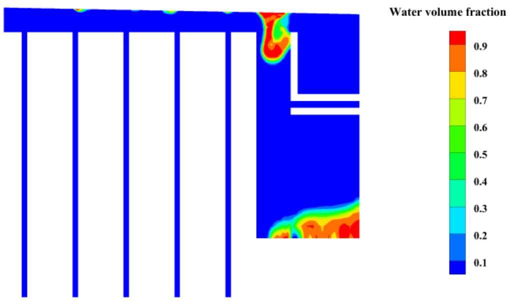


Figure 6. Water drops entering the chamber

4. Conclusion

The most important results obtained from this research are as follows:

- Single-phase simulation results showed that with the gradual reduction of the manifold height, the gas flow distribution among the cells of the stack improves;
- The results of the two-phase simulation showed that the condensation of water vapor causes the formation of water droplets on the manifold wall. The entry of liquid water into the cells reduces the flow of gas entering the cells. By gradually reducing the height of the manifold, the condensed water enters the end cell in shorter time intervals;
- It is suggested to install a chamber at the end of the manifold to collect liquid water. With the entry of liquid water into the chamber, the gas flow distribution between the cells obtained in the two-phase and single-phase simulations became almost the same.



علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بهبود توزیع جریان گاز در توده پیل‌سوختی پلیمری با خروج آب مایع از منیفولد*

مقاله پژوهشی

احمد رضایی سنگتابی[۱] علی کیانی فر[۲] ابراهیم علیزاده[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76562.1118

چکیده *در این مقاله، توزیع جریان اکسیژن در یک توده پیل‌سوختی پلیمری به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا توده به‌صورت تکفاز شبیه‌سازی شده و نقش کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد (منیفولد ذوزنقه‌ای) بر بهبود توزیع جریان میان سلول‌های سوختی بررسی گردید. از انحراف معیار و ضریب غیریکنواختی برای اندازه‌گیری بدتوزیعی جریان استفاده شده است. کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد تا ۷۰ درصد در منیفولد ذوزنقه‌ای، موجب بهبود ۶/۹ و ۸/۴ درصدی انحراف معیار استاندارد و ضریب غیریکنواختی گردید. نتایج شبیه‌سازی دوفازی نشان داد که چگالش بخارآب موجود در اکسیژن اشباع می‌تواند باعث تجمع آب مایع در انتهای منیفولد شود. با گذشت زمان و بهم پیوستن قطرات کوچک‌تر، شعاع قطره تشکیل شده در انتهای منیفولد افزایش یافته تا زمانی که از دیوار منیفولد جدا شده و وارد سلول‌های انتهایی گردد. در منیفولد ذوزنقه‌ای، آب مایع با مقدار کمتر و فواصل زمانی کوتاه‌تر وارد سلول انتهایی می‌گردد. پیشنهاد گردید با ایجاد محفظه‌ای در انتهای منیفولد، آب مایع جمع آوری شده و از توده تخلیه گردد. ورود مقداری گاز اضافه به منیفولد و خروج آن از محفظه جمع‌آوری آب می‌تواند باعث هدایت آب مایع به درون محفظه گردد بدون اینکه تغییرات محسوسی در افت فشار ایجاد کند.*

واژه‌های کلیدی توزیع جریان، پیل‌سوختی پلیمری، جریان دوفازی، تخلیه آب، منیفولد.

Improving the Gas Flow Distribution in a PEMFC Stack by Removing Liquid Water from the Manifold

Ahmad Rezaei Sangtabi Ali Kianifar Ebrahim Alizadeh

Abstract *This paper studied the oxygen flow distribution in a PEM fuel cell stack numerically. At first, the flow in the stack was simulated as a single phase, and the effect of gradual reduction of manifold height (tapered manifold) on improving the flow distribution between fuel cells was investigated. Standard deviation and non-uniformity coefficient have been used to measure the flow maldistribution. Gradual reduction of manifold height up to 70% in the tapered manifold improved standard deviation and non-uniformity coefficient by 6.9% and 8.4%, respectively. The results of the two-phase simulation showed that the condensation of water vapor in the saturated oxygen could cause the accumulation of liquid water at the end of the manifold. As the smaller droplets merged, the droplet radius formed at the end of the manifold increased until it detached from the manifold wall and entered the last cells. Less liquid water entered the last cell at shorter intervals in the tapered manifold. It was suggested that by creating a water chamber at the end of the manifold, condensed water be collected from the manifold and discharged from the stack. Increasing the mass flow at the manifold inlet and discharging the excess gas through the water collection chamber can push the liquid water into the chamber without causing significant changes in pressure drop.*

Key Words Flow distribution, PEM fuel cell, Two-phase Flow, Water removal, Manifold.

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۲/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۵/۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۲) نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

Email: a-kiani@um.ac.ir

مقدمه

پیل‌سوختی وسیله‌ای است که انرژی شیمیایی سوخت را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [1]. در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل‌سوختی پلیمری به دلیل دمای عملکردی پایین، چگالی توان بالا، الکترولیت جامد و قابلیت حمل‌ونقل دارای اهمیت فراوان بوده و می‌تواند جایگزینی برای موتورهای احتراق داخلی باشد [2].

یکی از محدودیت‌های پیل‌سوختی پلیمری، ولتاژ خروجی آن می‌باشد. ولتاژ خروجی هر پیل‌سوختی پلیمری در محدوده ۰/٦ تا ۱ ولت است. برای افزایش ولتاژ خروجی، چندین پیل‌سوختی به صورت سری به هم متصل شده و یک توده پیل‌سوختی را تشکیل می‌دهند. به‌دلیل سری بودن سلول‌ها، ولتاژ و بازده خروجی توده به عملکرد تک‌تک سلول‌ها وابسته بوده [3] و در شرایط ایده‌آل تمام سلول‌ها باید مقدار برابری گاز واکنش‌دهنده دریافت کنند. در توده پیل‌سوختی، گازهای واکنش‌دهنده به‌طور برابر میان سلول‌ها تقسیم نمی‌شوند و با افزایش تعداد سلول‌های توده، مقدار بدتوزیعی (Maldistribution) افزایش می‌یابد. از تاثیرات مخرب بدتوزیعی می‌توان به دمای متغیر سلول‌ها، امکان غرق شدگی سلول و کمبود گاز در برخی سلول‌ها اشاره کرد که باعث کاهش بازده و ولتاژ خروجی توده می‌گردد و در حالت بحرانی به غشای سلول‌ها آسیب می‌زند [4,5].

توزیع جریان و دمای سیال، افت فشار و جریان دوفازی در کانال‌های جریان یک پیل‌سوختی با روش‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است [6,7]. اما مطالعات تجربی کمی به بررسی موضوع بدتوزیعی جریان در یک توده پرداخته‌اند. کیم و کیم [8] به صورت تجربی سرعت لحظه‌ای جریان هوا میان کانال‌های یک توده پیل‌سوختی را اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد وجود زاویه قائمه در هندسه منیفولد می‌تواند باعث ایجاد گردابه و افزایش بدتوزیعی جریان شود و با خط جریانی کردن منیفولد می‌توان بدتوزیعی جریان را بهبود بخشید. نتایج تجربی لبیک و همکاران [9] نشان داد که ورود جریان از هندسه دایروی شکل لوله تغذیه به هندسه مستطیل شکل منیفولد می‌تواند باعث ایجاد جت جریان درون منیفولد شده و باعث توزیع نامتوازن جریان در توده شود. به همین‌دلیل استفاده از یک پخش‌کننده (Diffuser) جریان در ورودی توده را پشنهاد دادند. حسین و همکاران [10] با روابط تحلیلی، توزیع جریان در منیفولدی با ۳۳ کانال موازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به‌دلیل سرعت زیاد جریان در ورود به منیفولد بیشتر جریان از ۲۰ درصد کانال‌های انتهایی عبور می‌کند. که و همکاران [11] با استفاده از قانون دارسی نشان دادند که بدتوزیعی جریان در توده پیل‌سوختی با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و بدتوزیعی در بخش کاتد پیل‌سوختی شدیدتر است. پارک و لی [12] نشان دادند با افزایش قطر هیدرولیکی منیفولد و کاهش قطر هیدرولیکی کانال‌های صفحات دوقطبی، میانگین ولتاژ خروجی از سلول‌ها در توده افزایش می‌یابد. کریمی و همکاران [13] با بررسی روش های مختلف ورود/خروج جریان به/از توده، پیشنهاد دادند که جریان از دو سمت توده وارد منیفولد ورودی شده و از مرکز منیفولد خروجی تخلیه گردد. کین و همکاران [14] به‌صورت تحلیلی نشان دادند که با کاهش عرض کانال‌های جریان از ۰/٦ به ۰/۲ میلی‌متر، میانگین ولتاژ خروجی سلول‌ها از ۰/٦۲ به ۰/٦٦ ولت افزایش می‌یابد درحالی که افت فشار در توده بیش از ۱۰ برابر می‌شود. موستاتا و همکاران [15] بیان کردند به‌دلیل تعداد زیاد خروجی‌های جریان گاز از منیفولد به کانال‌های جریان صفحات دوقطبی، استفاده از تقریب شبکه هیدرولیک در روش‌های تحلیلی، نمی‌تواند نتایج دقیقی برای توزیع جریان گاز در توده ارائه دهد.

در مطالعات تحلیلی فرض‌هایی برای ساده‌سازی مدل‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند که باعث شده است که محققان از دینامیک سیالات محاسباتی برای افزایش دقت نتایج استفاده کنند. چن و همکاران [16] از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان درون توده ۷۲ سلولی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش افت‌فشار در کانال‌های جریان، کاهش دبی ورودی و افزایش عرض منیفولد می‌تواند در بهبود توزیع جریان موثر باشد. سو و همکاران [17] نشان دادند ورود جریان از لوله به منیفولد مستطیلی باعث شکل‌گیری گردابه‌هایی در منیفولد می‌گردد و سلول‌هایی که در نواحی شکل‌گیری گردابه قرار می‌گیرند، گاز کمتری دریافت می‌کنند. آن‌ها پیشنهاد دادند که سطح مقطع منیفولد توسط صفحاتی به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم شود تا از قدرت گردابه‌ها کاسته شده و توزیع گاز بهبود یابد. جکسون و همکاران [18] یک رابطه برای تغییر ارتفاع منیفولد برحسب تعداد سلول‌های یک توده ارائه دادند. رابطه ارائه شده اگرچه باعث بهبود توزیع جریان گردید اما باعث افزایش

بیش از ۱۰ برابر ارتفاع منیفولد در یک توده ۲۶ سلولی گردید. با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی، لیم و همکاران [19] پیشنهاد کردند جریان از دو سمت توده وارد مینفولد ورودی شده و پس از عبور کانال‌های جریان از دو انتهای توده خارج گردد.

افزایش رطوبت نسبی گازهای واکنش‌دهنده قبل از ورود به پیل‌سوختی، باعث بهبود عملکرد پیل‌سوختی می‌گردد [20]. به‌دلیل اینکه رسانایی پروتونی غشا پیل‌سوختی به رطوبت وابسته بوده، گازهای واکنش‌دهنده قبل از ورود به منیفولد فرآیند رطوبت‌زنی را طی می‌کنند. فرآیند رطوبت‌زنی می‌تواند در خارج از توده انجام پذیرد [21] و یا توسط رطوبت‌زن‌های تخت غشایی متصل به توده انجام شود [22]. نتایج عددی و تجربی ویلبرفورس و همکاران [23] نشان داد که استفاده از اکسیژن به‌جای هوا به‌عنوان اکسیدکننده به مقدار قابل توجهی عملکرد پیل‌سوختی را بهبود می بخشد. همچنین افزایش رطوبت نسبی گاز اکسیدکننده تا حالت اشباع، باعث افزایش بازده پیل‌سوختی می‌گردد.

در توده‌هایی که تعداد پیل‌های سوختی تشکیل‌دهنده آن زیاد و سطح فعال پیل‌های سوختی برای واکنش شیمیایی بزرگ می‌باشد، شبیه‌سازی کامل توده با درنظرگرفتن تمام جزییات، هزینه و زمان محاسبات بسیار زیادی به همراه خواهد داشت و نیاز به ابرکامپیوترهایی برای محاسبات می‌باشد. در نتیجه از روش‌های جایگزین برای بررسی توزیع جریان گاز در توده استفاده می‌شود. در دینامیک سیالات محاسباتی از کانال‌های موازی پرشده با محیط متخلخل برای شبیه‌سازی توزیع جریان در توده استفاده می‌شود [26-24]. ضرایب مربوط به محیط متخلخل باید به‌گونه‌ای محاسبه گردند که افت‌فشار ایجاد شده در توده معادل افت‌فشار کانال‌های جریان پیل‌سوختی گردد.

بدتوزیعی جریان در منیفولد کاتد توده شدیدتر بوده [11] و کاهش بدتوزیعی در بخش کاتد از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مقاله، بدتوزیعی جریان در بخش کاتد توده پیل‌سوختی ۵۲ سلولی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبیه‌سازی توده از شرایط عملکردی یک توده پیل سوختی حقیقی استفاده شده است. در ابتدا توده به صورت تکفاز شبیه‌سازی می‌گردد و کاهش ارتفاع تدریجی منیفولد به‌عنوان راهکاری برای بهبود بدتوزیعی بررسی می‌گردد. سپس جریان گاز درون منیفولد توده به صورت دوفازی شبیه‌سازی می‌گردد تا نقش تغییرفاز بخارآب موجود در گاز واکنش‌دهنده بر توزیع جریان گاز در توده مطالعه گردد. در انتها راهکاری برای تخلیه آب مایع درون منیفولد پیشنهاد می‌گردد تا از ورود آب مایع به درون سلول‌های سوختی جلوگیری شود.

معادلات حاکم

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در منیفولد بخش کاتد توده پیل‌سوختی پلیمری، شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، کسر جرمی و بقای گونه‌ها و آشفتگی می‌باشد [26]. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho U) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla.(\rho UU) = -\nabla P + \rho g + \nabla.\tau + F \quad (۲)$$

در معادلات فوق ρ، U، p و τ به ترتیب چگالی، بردار سرعت، فشار و تانسور تنش می‌باشند. چگالی با استفاده از کسر حجمی فازهای مختلف بدست می‌آید:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (۳)$$

چگالی مخلوط اکسیژن و بخار آب از روابط گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود:

$$\rho_2 = \frac{PM_{mix}}{\bar{R}T} \quad (٤)$$

عبارت آخر معادله اندازه حرکت، تاثیرات نیروی کشش سطحی و محیط متخلخل را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن نیروی کشش سطحی از مدل نیروی سطحی پیوسته [27] استفاده می‌شود. این نیرو به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f = \sigma \kappa \nabla \alpha_1 \quad (۵)$$

که در آن κ انحنای سطح و σ ضریب کشش سطحی می‌باشد. ضریب کشش سطحی آب مایع ثابت در نظر گرفته شده و انحنای سطح از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\kappa = \nabla . \hat{n} \qquad (٦)$$

در رابطه فوق، $\hat{n}$ بردار یکه عمود بر سطح مشترک فازهای مایع و گاز بوده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\vec{n} = \frac{\nabla \alpha_1}{|\nabla \alpha_1|} \qquad (٧)$$

چسبندگی مایع به سطح دیوارها بر انحنای سطح مشترک فازها در نزدیک دیوار تاثیر می‌گذارد. بردار یکه در مجاورت دیوار و براساس زاویه تماس استاتیک از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\vec{n} = \vec{n}_w \cos(\theta_w) + \hat{t}_w \cos(\theta_w) \qquad (٨)$$

که در رابطه فوق $\hat{n}_w$ و $\hat{t}_w$ به ترتیب بردارهای عمود و هم‌راستا با دیوار می‌باشند. θ_w زاویه تماس استاتیک بوده و به‌صورت زاویه بین دیوار و مماس سطح مشترک مایع-گاز بر روی دیوار تعیین می‌گردد. در مرجع [28]، کانال‌های جریان یک پیل‌سوختی به تنهایی شبیه‌سازی شده و افت‌فشار ناشی از عبور گاز از یک پیل‌سوختی محاسبه شده است. در این مطالعه از کانال‌های مستقیم پرشده از مواد متخلخل برای ایجاد افت فشاری معادل با افت‌فشار محاسبه شده در مرجع [28] استفاده می‌گردد. محیط متخلخل در معادله ممنتوم با اضافه شدن ترم زیر تعریف می‌گردد:

$$s = -\frac{\mu}{\vartheta} U \qquad (٩)$$

در رابطه فوق ضریب ϑ به گونه‌ای باید محاسبه گردد تا افت فشاری معادل با عبور گاز از کانال‌های جریان یک پیل‌سوختی ایجاد کند. عبارت F در معادله اندازه حرکت مجموع روابط (٥ و ٩) می‌باشد.

در ورودی توده، عدد رینولدز جریان بیش از ١٧٠٠٠ می‌باشد که بیانگر جریان آشفته در منیفولد می‌باشد و به همین منظور از مدل k-ε استاندارد برای شبیه‌سازی جریان آشفته استفاده شده است [29]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla.(\rho U k) = \nabla.((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\nabla k) + P_k - \rho\varepsilon \qquad (١٠)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla.(\rho U \varepsilon) = \nabla.((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\nabla\varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \qquad (١١)$$

فشار اشباع آب موجود در اکسیژن ورودی به دما وابسته بوده و حتی تغییرات اندک دما نقشی موثر در چگالش یا تبخیر آب در فازهای گازی و مایع دارد. همچنین به دیوار منیفولد شرط انتقال حرارت جابه‌جایی اعمال شده که موجب می‌گردد دمای گاز درون منیفولد کاهش پیدا کند. معادله انرژی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla.(\rho C_p U T) = \nabla.((K + C_p \frac{\mu_t}{Pr_t})\nabla T) + \dot{m} h_{fg} \qquad (١٢)$$

که در آن μ_t و Pr_t به‌ترتیب ویسکوزیته و عدد پرانتل توربولانس می‌باشند [30]. عبارت انتهایی ناشی از اختلاف آنتالپی آب در حالت بخار و مایع می‌باشد. این مقدار برای چگالش به صورت مثبت و برای تبخیر منفی خواهد بود. در معادله بالا خواهیم داشت [31]:

$$\rho C_p = \rho_1 C_{p1}\alpha_1 + \rho_2 C_{p2}\alpha_2 \qquad (١٣)$$

$$K = K_1\alpha_1 + K_2\alpha_2 \qquad (١٤)$$

در معادله انرژی $\dot{m}$ نرخ جرمی آب تغییر فاز دهنده و h_{fg} اختلاف آنتالپی آب در حالت بخار و مایع می‌باشد.
مقدار جرمی که دچار تغییر فاز خواهد شد از رابطه زیر بدست خواهد آمد [31]:

$$\dot{m} = \begin{cases} \dfrac{k_{cond}(1-\alpha_1)M_g^{H_2o}}{\bar{R}T} P(x_g^{H_2o} - x_{sat}^{H_2o}) & x_g^{H_2o} \geq x_{sat}^{H_2o} \\ k_{evap}\alpha_1\rho_1 P(x_g^{H_2o} - x_{sat}^{H_2o}) & x_g^{H_2o} < x_{sat}^{H_2o} \end{cases} \qquad (١٥)$$

در رابطه فوق k_{cond} و k_{evap} ضرایب تجربی هستند که مقادیر آن‌ها برای جریان درون پیل‌سوختی در مرجع [31] بیان شده است. برای بدست آوردن فشار اشباع بخار آب، از جدول ترمودینامیکی در محدوده دمایی ٢٧٣ تا ٣٧٣ درجه کلوین، رابطه‌ای برای فشار بخارآب برحسب دما به صورت زیر استخراج شده است [31]:

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24(T-273.15) -10.554(T-273.15)^2 + 0.166636(T-273.15)^3 \quad (۱۶)$$

همچنین گرمای نهان آب برای محدوده دمایی ۲۷۳ تا ۳۷۳ کلوین با رابطه زیر و با دقت قابل قبولی تقریب زده می‌شـود [31]:

$$h_{fg} = 307090(647.15-T)^{0.35549} \quad (۱۷)$$

برای شبیه‌سازی جریان دوفازی از روش کسر حجمی [32] استفاده شده است. در روش کسر حجمی از یک معادله انتقال اضـافی برای مشـخص کردن میزان حجم هر یک از فازها در حجم کنترل استفاده می شود. اساس روش بر این استوار است که متغیری نشـان‌دهنده نسبت حجم یکی از فازها به حجم کل اسـت. برای مثال $\alpha_1 = 1$ نشـان‌دهنده پر بودن حجم کنترل از مایع و $\alpha_1 = 0$ بیانگر پر بودن حجم کنترل از گاز خواهد بود. معادله کسـر حجمی در فرآیند تغییرفاز به صـورت زیر تعریف می‌گردد [32]:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla.(U\alpha_1) + \nabla.(U_r\alpha_1(1-\alpha_1)) = -\dot{m}(\frac{1}{\rho_1} - \alpha_1(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2})) \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق U_r سـرعت فشـردگی نامیده می‌شـود که در ناحیه سـطح مشـترک دو فاز و در جهت عمود بر آن در نظر گرفته می شود تا از انتشار عددی جلوگیری کند [33]. سرعت فشردگی در سطح هر سلول محاسباتی با استفاده از سرعت بیشینه در سطح مشترک و گرادیان کسر حجمی بدست می‌آید [34]:

$$U_r = \min[C_a|U|, \max(|U|)]\frac{\nabla\alpha_1}{|\nabla\alpha_1|} \quad (۱۹)$$

در رابطه فوق ضریب C_a می‌تواند مقداری بین ۱ تا ٤ داشته باشـد [34]. این ضـریب در تحقیق حاضـر ۱ در نظر گرفته می‌شود. گاز ورودی شامل اکسیژن و بخار آب می‌باشد و با حل معادله بقای گونه برای بخارآب، کسـر جرمی بخارآب بدسـت می‌آید:

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \nabla.(\rho U y_i) = \nabla.((\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t})\nabla y_i) - S_i \quad (۲۰)$$

در رابطه بالا y_i کسر جرمی و D_i ضریب نفوذ گونه iام در مخلوط گازها می‌باشـد و ترم چشـمه برابر با نرخ چگالش یا تبخیر خواهد بود.. ضریب نفوذ برای مخلوط اکسیژن و بخارآب از رابطه زیر بدست آمده است:

$$D_i = \frac{a}{P}(\frac{T}{\sqrt{T_{c,1}T_{c,2}}})^b (P_{c,1}P_{c,2})^{1/3}(T_{c,1}T_{c,2})^{5/12}\left(\frac{1}{M_1}+\frac{1}{M_2}\right)^{1/2} \quad (۲۱)$$

ضـرایب a و b برای بخارآب ۰/۰۰۰۳٦٤ و ۲/۳۳٤ و برای اکسـیژن ۰/۰۰۰۲۷٤٥ و ۱/۸۳۲ می‌باشـند [1]. ویسـکوزیته و ضـریب انتقال حرارت هدایتی فاز گاز براسـاس روابط مخلوط گاز ایده‌آل محاسبه می‌گردد [31]:

$$\mu_{mix} = \sum_i \frac{x_i\mu_i}{\sum_j x_j\phi_{ij}} \quad (۲۲)$$

$$k_{mix} = \sum_i \frac{x_i k_i}{\sum_j x_j\phi_{ij}} \quad (۲۳)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1+\left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{0.5}\left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{0.25}\right]^2}{\left[8\left(1+\frac{M_i}{M_j}\right)^{0.5}\right]} \quad (۲٤)$$

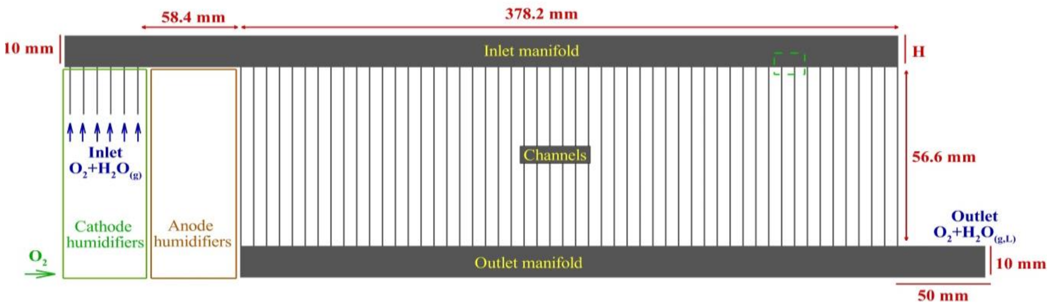
خواص فیزیکی سـیالات مورد اسـتفاده در این مطالعه در جدول (۱) گردآوری شده است.

تعریف مسئله

در این مطالعه، منیفولد بخش کاتد یک توده پیل سوختی پلیمری با ٥۲ سلول به صورت دوفازی شبیه سازی می شود. در شکل (۱)، فضای محاسباتی مورد مطالعه ترسیم شده است.

جدول ۱ خواص فیزیکی سیالات [35,36]

خاصیت	واحد	اکسیژن	بخارآب	آب مایع
C_p	J. kg^{-1}. K^{-1}	۲۰۱٤	۹۱۹/۳۱	٤۱۸۰
M	g. mol^{-1}	۳۲	۱۸	۱۸
$\bar{R}$	J. kg^{-1}. K^{-1}	۲٥۹/۸	٤٦۱/۸۹	–
μ	Pa. s	$۱/۹\times۱۰^{-٥}$	$۱/۳\times۱۰^{-٥}$	$٤/۱\times۱۰^{-٤}$
K	W. m^{-1}. K^{-1}	۰/۰۲٤٦	۰/۰۲٦۱	۰/٥۸
T_c	K	۱٥٤	٦٤۷/۳	–
P_c	atm	٤۹/۸	۲۱۸	–



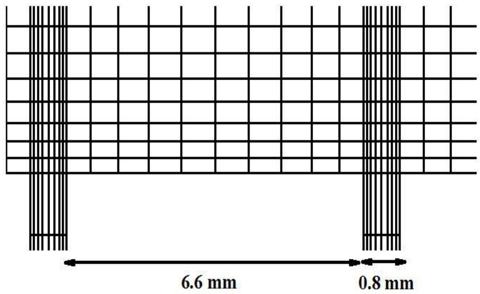
شکل ۱ فضای محاسباتی

فضای محاسباتی شامل ٦ ورودی جریان، منیفولد ورودی، کانال‌های جریان و منیفولد خروجی می‌باشد. در توده مورد مطالعه از رطوبت‌زن‌های تخت غشایی برای افزایش رطوبت نسبی گاز ورودی استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱) نمایش داده شده است، ابتدا ٦رطوبت‌زن‌های آند و سپس ٦رطوبت‌زن کاتد به توده متصل می‌شوند. فرض می‌شود که گاز اکسیژن از منبع تغذیه وارد رطوبت‌زن‌های کاتد شده و به صورت اشباع وارد منیفولد ورودی گردد. به‌همین جهت رطوبت‌زن‌ها شبیه‌سازی نشده و فقط ٦ ورودی با شرایط مرزی دبی جرمی ثابت و در حالت اشباع در نظر گرفته می‌شوند. ارتفاع منیفولدهای ورودی و خروجی ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. کانال‌های جریان صفحات دوقطبی با کانال‌های موازی با ارتفاع ٥٦/٦ میلی‌متر جایگزین شده و برای ایجاد افت‌فشار معادل، از مواد متخلخل استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب محیط متخلخل، یک کانال با ارتفاع ٥٦/٦ میلی‌متر و دبی میانگین گذرنده از سلول‌ها شبیه‌سازی شده و با روش سعی و خطا، ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل به‌گونه‌ای محاسبه می‌گردد تا افت‌فشاری معادل با افت‌فشار ناشی از عبور جریان از کانال صفحات دوقطبی بدست آمده در مرجع [28] در کانال ٥٦/٦ میلی‌متری ایجاد گردد. منیفولد خروجی به مقدار ٥۰ میلی‌متر ادامه یافته تا از ورود جریان برگشتی به درون توده جلوگیری گردد.

بخشی از شکل (۱) که به صورت خط‌چین و به رنگ سبز مشخص شده، در شکل (۲) بزرگنمایی شده است. از مش سازمان‌یافته برای شبکه‌بندی فضای محاسباتی استفاده شده و در نزدیک دیوارها شبکه تراکم بیشتری دارد. عرض هر کانال ۰/۸ میلی‌متر و فاصله بین دو کانال ٦/٦ میلی‌متر می‌باشد.

دبی جریان جرمی ورودی به منیفولد براساس سطح فعال سلول، استوکیومتری، جریان الکتریکی، ثابت فارادی، تعداد سلول‌ها و شرایط عملکردی توده بدست می‌آید. جریان اکسیژن با دبی ۸۳/۲۱۸ استاندارد لیتر بر دقیقه و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد وارد رطوبت‌زن‌ها شده و پس از افزایش رطوبت نسبی، به‌صورت اشباع وارد منیفولد می‌گردد. فرض می‌شود در ورودی، سیال به‌صورت گاز بوده و فاقد قطرات آب باشد ($\alpha_1 = 0$). کسر جرمی بخارآب در ورودی نیز با توجه به دما و فشار عملکردی توده تعیین می‌گردد. بر دیوارها شرایط عدم لغزش اعمال شده است. دمای دیوار کانال‌ها برابر با دمای

عملکردی توده است. بر دیوارهای منیفولد شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی با هوای محیط اعمال شده است. در خروجی فشار برابر با فشار عملکردی سیستم در نظر گرفته شده است و گرادیان متغیرهای دیگر برابر با صفر تعیین شده است. زاویه تماس قطره آب با دیوارهای کانال و دیوار منیفولد به ترتیب ۱۳۵ و ٤٥ تعیین شده است [37,38].



شکل ۲ بزرگنمایی شبکه بندی فضای محاسباتی

برای حل معادلات حاکم در نرم‌افزار اپن‌فوم (OpenFoam) از الگوریتم پیزو استفاده می‌گردد. برای گسسته سازی عبارات جابه‌جایی از روش ون‌لیر و برای گسسته‌سازی عبارت زمانی از روش اولر استفاده می‌شود. در هر گام زمانی، میزان باقی‌مانده برای تمام معادلات مقدار $۱۰^{-۶}$ قرار داده شد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در معادلات حاکم و شرایط مرزی در جدول (۲) درج شده است.

جدول ۲ پارامترهای موجود در معادلات حاکم و شرایط مرزی [30,31]

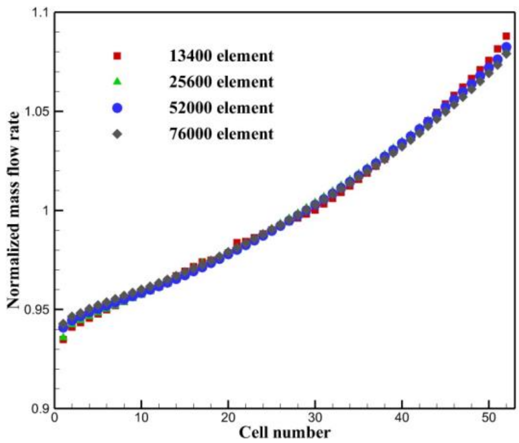
پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
کشش سطحی (σ)	$kg.s^{-2}$	۰/۷
پرانتل آشفتگی (Pr_t)	-	۰/۸۵
اشمیت آشفتگی (Sc_t)	-	۰/۷
ضریب چگالش (k_{cond})	s^{-1}	۱۰۰
ضریب تبخیر (k_{evap})	$Pa^{-1}.s^{-1}$	$۹/۸\times۱۰^{-۶}$
دمای محیط (T_∞)	K	۲۹۸
ضریب هدایت حرارتی (h_∞)	$W.m^{-2}.K^{-1}$	۱۰۰
دمای عملکردی (T_{op})	K	۳٤۳
فشار عملکردی (P_{op})	bar	۲
نفوذپذیری محیط متخلخل (ϑ)	m^2	$۵/۱۵\times۱۰^{-۸}$

حل مستقل از شبکه

برای شبیه سازی جریان دوفازی بخش کاتد در این تحقیق، نیاز به توسعه کدهای موجود در نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم می‌باشد. اعتبار کد مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در منیفولد کاتد توده پیل‌سوختی، در مرجع [28] بررسی شده و برای پرهیز از تکرار، نتایج مربوط به اعتبار سنجی در این تحقیق ارائه نمی‌گردد.

برای دستیابی به حل مستقل از شبکه، توزیع جریان گاز میان سلول‌های سوختی توده، توسط چهار شبکه متفاوت شبیه‌سازی شده و نمودار دبی جرمی بی‌بعد گذرنده از هر سلول در شکل (۳) آورده شده است. محور افقی در نمودارهای مقاله نشان دهنده شماره سلول سوختی در توده می‌باشد. سلول شماره ۱ نزدیک‌ترین سلول به ورودی توده و سلول شماره ۵۲ نزدیک‌ترین سلول به خروجی توده می‌باشد. دبی جرمی در هر سلول سوختی با استفاده از میانگین دبی جرمی گذرنده از تمام سلول‌ها بی‌بعد شده است تا میزان اختلاف دبی دریافتی توسط هر سلول از مقدار میانگین مشخص گردد.

تفاوت مقدار دبی جرمی گذرنده از اولین سلول سوختی برای شبکه‌هایی با تعداد ۵۲ و ۷٦ هزار سلول محاسباتی کمتر از ۰/۲ درصد می‌باشد. در نتیجه از هندسه با تعداد ۵۲ هزار سلول محاسباتی برای ادامه تحقیق استفاده شده است.



شکل ۳ بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

نتایج

برای بررسی میزان بدتوزیعی جریان سیال بین سلول‌های توده از دو پارامتر استفاده می شود. پارامتر اول ضریب غیریکنواختی جریان [39] است که با استفاده از بیشترین و کمترین جریان جرمی عبوری از سلول‌های توده محاسبه می‌گردد:

$$F_1 = \frac{\max(\dot{m}_1 \ldots \dot{m}_{52}) - \min(\dot{m}_1 \ldots \dot{m}_{52})}{\max(\dot{m}_1 \ldots \dot{m}_{52})} \qquad (۲۵)$$

پارامتر دوم انحراف معیار استاندارد می‌باشد که که با در نظر گرفتن اختلاف دبی گذرنده از هر سلول با مقدار میانگین (مقدار ایده‌آل) از رابطه زیر بدست می‌آید:

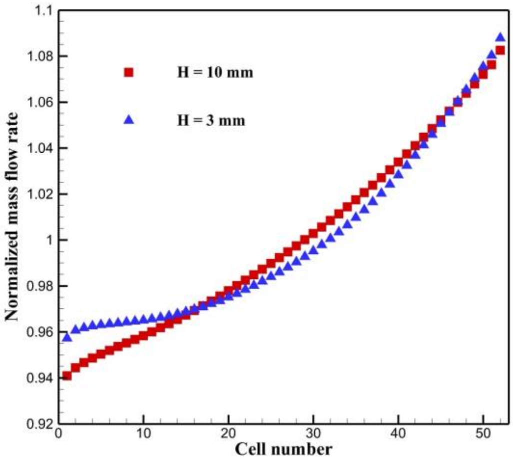
$$F_2 = \sqrt{\frac{\sum(\dot{m}_i - \dot{m}_{ave})^2}{N-1}} \qquad (۲۶)$$

مقادیر کوچک‌تر این دو پارامتر به معنای توزیع بهتر جریان می‌باشد.

شبیه سازی تکفاز توده. در ابتدا، توزیع جریان اکسیژن میان سلول‌های سوختی به‌صورت تکفاز شبیه‌سازی شده و یکی از راهکارهای پیشنهادی در مطالعات پیشین برای بهبود توزیع جریان گاز میان سلول‌های سوختی توده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بسیاری از مطالعات، جریان درون منیفولد به‌صورت تکفازی شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به تغییرات کم دمای گاز در منیفولد، هنگامی که گاز به صورت خشک و یا با رطوبت نسبی پایین وارد توده گردد، تغییرات کم دما موجب چگالش بخارآب موجود در گاز ورودی نمی‌گردد. در این حالت می‌توان از نتایج شبیه‌سازی تکفاز استفاده کرد.

یکی از راهکارهای بهبود توزیع جریان میان سلول‌های سوختی در توده، کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد ورودی می‌باشد. بدین صورت که ارتفاع میفولد از سلول اول تا انتهای توده با شیب یکسان کاهش می‌یابد. در شکل (۱) ارتفاع انتهایی منیفولد با حرف H نمایش داده شده است. در این مقاله کاهش ۷۰ درصدی ارتفاع منیفولد بررسی می‌شود و فرض می‌شود که ارتفاع منیفولد از ۱۰ میلی‌متر در ابتدا تا ۳ میلی‌متر در انتها (H=3mm) کاهش یابد. در شکل (٤) توزیع جریان گاز میان سلول‌های سوختی در حالت تکفاز نمایش داده شده است. با توجه به شکل (٤)، کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد موجب افزایش دبی جرمی ورودی به سلول‌های ابتدایی می‌گردد. سرعت گاز در ورود به منیفولد بیشینه است و با پیشروی در توده از سرعت آن کاسته شده و بر فشار استاتیک افزوده می‌شود. در انتهای منیفولد، فشار استاتیک به بیشترین مقدار خود می‌رسد و دبی بیشتری از سلول‌های انتهایی می‌گذرد. کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد موجب می‌گردد سرعت محلی جریان در طول منیفولد افزایش یابد و توزیع فشار استاتیک نسبت به حالت اولیه بهبود یابد. بهبود توزیع فشار موجب می‌گردد که دبی جرمی ورودی به سلول‌های ابتدایی افزایش یابد.

دبی بی‌بعد گذرنده از سلول اول از ۰/۹٤۱ در حالت اولیه H=10 mm به مقدار ۰/۹۵۷ در حالت H=3 mm ر سیده ا ست. در جدول (۳) پارامترهای توزیع جریان برای شکل (٤) محاسبه شده است. با توجه به جدول (۳)، ضریب غیریکنواختی و انحراف معیار به‌ترتیب ۸/٤ و ٦/۹ درصد بهبود یافتند.



شکل ٤ توزیع جریان در توده پیل‌سوختی به صورت تکفاز

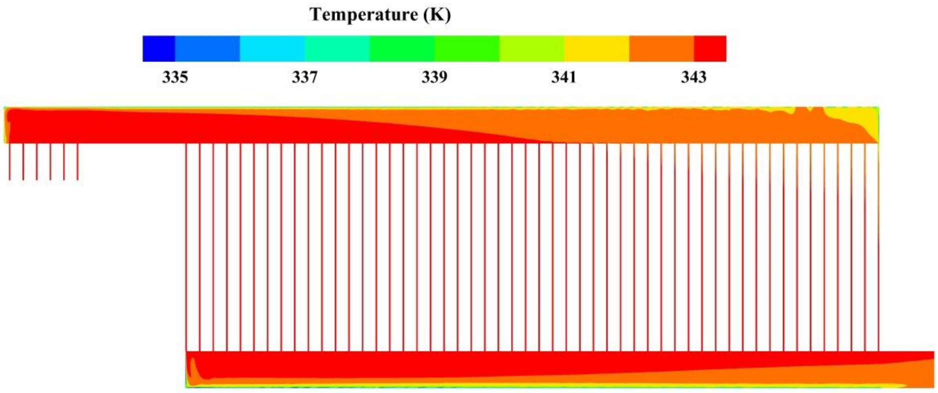
جدول ۳ پارامترهای توزیع جریان در شبیه‌سازی تکفاز

ارتفاع انتهای منیفولد	ضریب غیریکنواختی	انحراف معیار
H = 10 mm	۰/۱۳۱	۰/۰٤۰٦
H = 3 mm	۰/۱۲۰	۰/۰۳۷۸

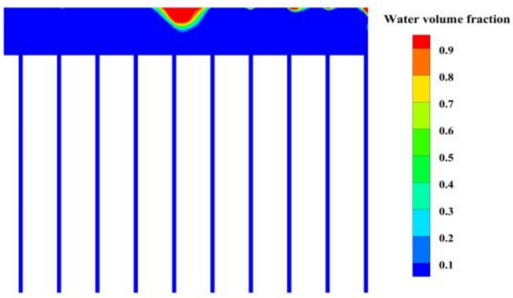
شبیه‌سازی دوفازی توده با ارتفاع ثابت منیفولد. در این بخش نقش تغییرفاز بخارآب بر توزیع جریان گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که گاز ورودی به منیفولد به‌صورت اشباع باشد، تغییرات ناچیز دما موجب چگالش بخشی از بخارآب موجود در مخلوط گاز ورودی می‌شود. در شکل (۵) کانتور دمای گاز در توده ترسیم شده است. در شکل (۵) مشخص است که کاهش دما در منیفولد ناچیز بوده و فرآیند چگالش به‌کندی صورت می‌گیرد. با توجه به انتقال حرارت از دیوار بالایی منیفولد، آب مایع نیز باید بر روی دیوار بالایی منیفولد تشکیل گردد. طول منیفولد که به تعداد سلول‌های سوختی در یک توده وابسته است

نقش مهمی در تغییرات دمای گاز درون منیفولد دارد و توده‌های طویل‌تر انتقال حرارت بیشتر و تغییرات دمایی بیشتری دارند. شبیه‌سازی عددی نشان داد که نرخ چگالش آب مایع بر روی دیوار بالایی بسیار پایین بوده و تشکیل قطره آب بر روی دیوار زمان‌بر است. به‌دلیل اینکه سرعت جریان درابتدای منیفولد زیادتر می‌باشد، آب مایع به سمت انتهای منیفولد هدایت می‌گردد. قطره‌های کوچک آب به‌هم پیوسته و قطراتی با شعاع بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند. در شکل (٦) کسر حجمی آب مایع و قطره آب تشکیل‌شده بر روی دیوار منیفولد پس از گذشت ۵۰/۲ ثانیه نشان داده شده است. برای نمایش بهتر، بخش انتهایی منیفولد بزرگنمایی شده است.

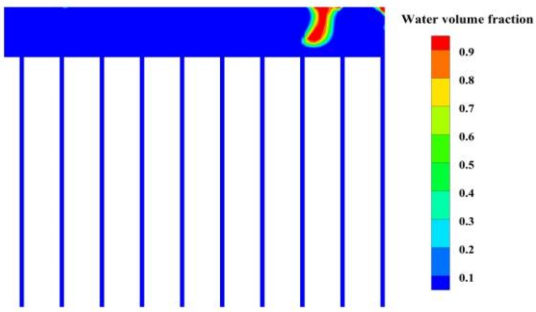
با توجه به شکل (۷) که کسر حجمی آب مایع را در زمان ۵۰/۵ ثانیه نشان می‌دهد، شعاع قطره شکل گرفته بر روی دیوار بالایی با پیوستن قطرات کوچک‌تر افزایش یافته تا جایی که نیروی وزن بر نیروی چسبندگی غلبه کند. آن‌گاه قطره از سطح دیوار بالایی منیفولد جدا می‌گردد. هنگامی که قطره آب در حال جدا شدن از سطح دیوار می‌باشد، بخش بزرگی از سطح منیفولد مسدود می‌گردد. نیروی وارد از گاز درون منیفولد، باعث تغییر شکل قطره می‌گردد.



شکل ۵ کانتور دما در توده



شکل ٦ کانتور کسر حجمی در ثانیه ۵۰/۲



شکل ۷ کانتور کسر حجمی در ثانیه ۵۰/۵

در شکل (۸) کانتور کسر حجمی آب مایع در زمان ۵۰/۶ ثانیه نشان داده شده است. نیروی جریان گاز موجب حرکت قطره به سمت انتهای منیفولد و نیروی وزن موجب حرکت قطره به سمت سلول‌ها می‌گردد. به‌همین دلیل انتهای قطره جداشده از دیوار بالایی منیفولد به ورودی سلول ۵۱ برخورد کرده و بخش کوچکی از آن وارد سلول ۵۱ می‌شود. بخش اعظم آب مایع به همراه جریان گاز به انتهای منیفولد رسیده و پس از برخورد به دیوار انتهایی توده، به‌دلیل نیروی وزن به سمت سلول ۵۲ حرکت می‌کند. باتوجه به اینکه شعاع قطره از عرض سلول‌ها بزرگ‌تر است، تمام آب مایع به یکباره وارد سلول انتهایی نمی‌شود که منجر به تجمع آب مایع در ورودی سلول ۵۲ می‌گردد. جریان گاز در کانال و وزن آب موجب تخلیه سریع آب از سلول انتهایی می‌شود.

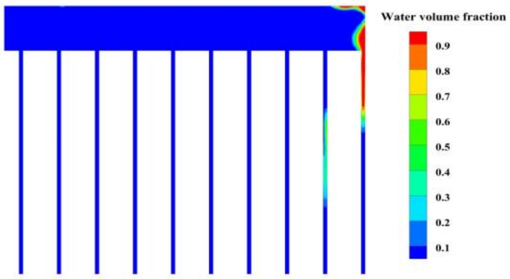
برای محاسبه آب مایع موجود در هر سلول از انتگرال زیر برای هر سلول سوختی استفاده می‌کنیم:

$$m = \int \rho dxdy \qquad (۲۷)$$

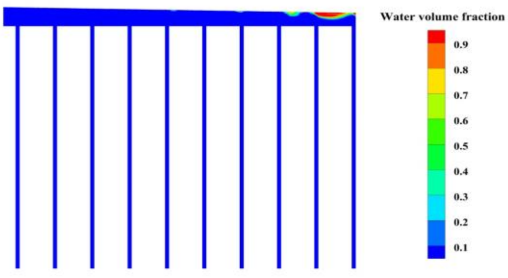
انتگرال فوق برای سلول ۵۲ در زمان ۵۰/۸ ثانیه برابر با ۲۶/۸۳ و برای سلول ۵۱ در زمان ۵۰/۶ ثانیه برابر با ۵/۱۲ محاسبه شده است. اختلاف ۰/۲ ثانیه در محاسبه انتگرال فوق برای سلول‌های ۵۱ و ۵۲ بدین دلیل می‌باشد که حجم آب ورودی به سلول ۵۲ بیشتر بوده و ۰/۲ ثانیه زمان لازم می‌باشد تا تمام آب مایع وارد کانال گردد.

شبیه سازی دوفازی توده با منیفولد ذوزنقه‌ای. در شبیه سازی تک‌فاز نشان داده شد که کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد می‌تواند باعث بهبود توزیع جریان گاز ورودی به سلول‌های ابتدایی شده و از بدتوزیعی بکاهد. کاهش ارتفاع منیفولد موجب افزایش سرعت جریان گاز در طول منیفولد و در نتیجه افزایش نیرو بر آب مایع تشکیل شده بر دیوار بالایی منیفولد می‌گردد. همچنین به دلیل شیب ایجاد شده، نیروی وزن نیز به حرکت آب مایع به سمت انتهای منیفولد کمک می‌کند و در نتیجه سرعت تشکیل قطره با شعاع بزرگ‌تر در انتهای منیفولد افزایش می‌یابد. در شکل (۹) کانتور کسر حجمی برای توده با منیفولد ذوزنقه‌ای در زمان ۱۰/۹ ثانیه نمایش داده شده است. در منیفولد مستطیلی (H=10 mm) بیش از ۵۰ ثانیه زمان برای تشکیل قطره و جدایش زمان لازم بوده است اما در منیفولد ذوزنقه‌ای در حدود ۱۱ ثانیه زمان برای شکل‌گیری قطره با حداکثر شعاع زمان لازم است.

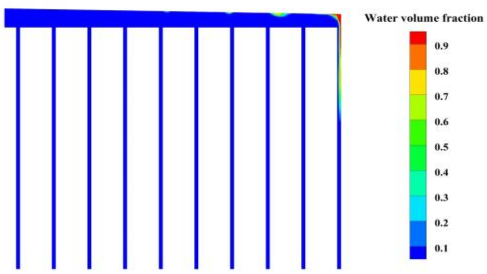
در منیفولد مستطیلی، شعاع قطره تا حدی افزایش می‌یابد تا وزن آن بر نیروی چسبندگی غلبه کرده و قطره از دیوار بالایی منیفولد جدا شود. اما در منیفولد ذوزنقه‌ای شعاع قطره رشد کمتری می‌کند، به‌دلیل اینکه سطح مقطع منیفولد تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد و جریان از فضای کوچک باقی‌مانده بین قطره و سلول‌ها باید وارد سلول انتهایی گردد. افزایش نیروی وارده از جریان گاز به قطره و همچنین کمک نیروی وزن موجب می‌گردد که قطره به آرامی به انتهای منیفولد رسیده و وارد سلول انتهایی گردد (شکل ۱۰).



شکل ۸ کانتور کسر حجمی در ثانیه ۵۰/۶



شکل ۹ کانتور کسر حجمی در ثانیه ۱۰/۹



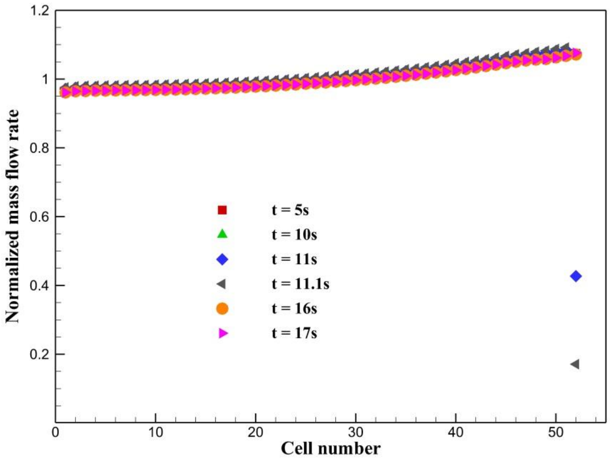
شکل ۱۰ کانتور کسر حجمی در ثانیه ۱۱

در منیفولد مستطیلی، جدایش قطره آب موجب گردید که آب مایع وارد سلول ۵۱ و ۵۲ گردد اما در منیفولد ذوزنقه‌ای، قطره آب به انتهای منیفولد رسیده و پس از برخورد با دیوار انتهایی توده فقط وارد سلول ۵۲ می‌گردد. انتگرال رابطه (۲۷) برای سلول ۵۲ در منیفولد ذوزنقه‌ای در زمان‌های ۱۱/۱، ۱۵/۱ و ۲۲/۹ ثانیه به ترتیب ۸/۱، ۲/۹۳ و ٤/٤٥ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد در منیفولد ذوزنقه‌ای شکل، آب مایع به مقدار کمتر اما در فواصل زمانی کوتاه‌تر وارد سلول انتهایی می‌گردد. در شکل (۱۱) دبی جرمی گذرنده از سلول‌های توده با منیفولد ذوزنقه‌ای در زمان‌های مختلف ترسیم شده است. در زمان‌هایی که آب مایع وارد سلول انتهایی نشده است، توزیع گاز حالتی ثابت داشته و با زمان تغییر نمی‌کند و مشابه نتایج بدست آمده از حالت تکفاز می‌باشد. اما با ورود آب به سلول انتهایی، دبی گذرنده از سلول آخر کاهش قابل توجهی دارد و به دلیل بقای جرم، دبی گذرنده از بقیه سلول‌ها افزایش ناچیزی می‌یابد.

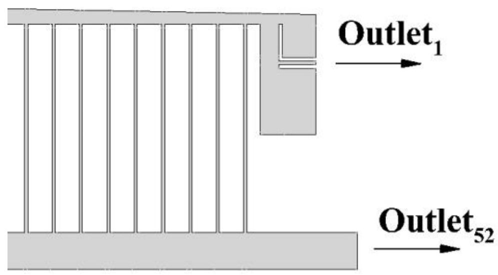
ورود آب مایع از منیفولد به سلول‌های یک توده می‌تواند موجب انسداد برخی کانال‌های جریان، کاهش جریان الکتریکی و یا غرق‌شدن سلول سوختی گردد. به همین‌جهت در ادامه راهکاری برای خروج آب مایع در منیفولد پیشنهاد می‌گردد.

منیفولد با محفظه جمع‌آوری آب مایع. در شکل (۱۲) هندسه پیشنهادی برای خروج آب مایع از منیفولد ورودی و جلوگیری از ورود آب به سلول انتهایی نمایش داده شده است. فرض می‌شود فضایی در انتهای توده برای جمع‌آوری و تخلیه آب مایع در نظر گرفته شود. این فضا می‌تواند در صفحه نگهدارنده انتهایی و یا جداساز تعبیه گردد. در برخی از توده‌ها، از جداساز متصل به توده برای تفکیک گاز و آب مایع خارج شده از منیفولد خروجی استفاده می‌کنند تا گاز اضافی خروجی از سلول‌ها دوباره مورد استفاده قرار گیرد. می‌توان در قسمت زیرین این محفظه یک شیر برقی قرار داد تا هنگامی که سطح آب مایع به مقدار مشخصی برسد فرآیند تخلیه آب صورت گیرد و از خروج گاز مورد نیاز برای واکنش های شیمیایی سلول‌ها از منیفولد جلوگیری شود.

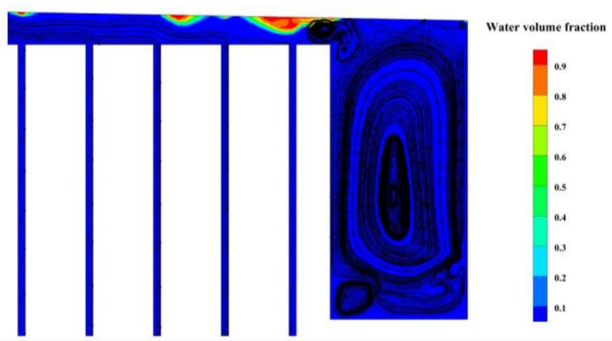
در ابتدا فرض می‌شود که یک محفظه بسته در انتهای منیفولد تعبیه شود و خروجی با زیرنویس ۱ در شکل (۱۲) وجود نداشته باشد. هدف از طرح پیشنهادی، استفاده از نیروی وزن برای هدایت آب مایع به درون محفظه می‌باشد. در شکل (۱۳) کانتور کسرحجمی آب مایع و خطوط جریان در بخش انتهایی منیفولد پیشنهادی ترسیم شده است. به‌دلیل بسته بودن فضای محفظه، گردابه‌هایی در محفظه شکل می‌گیرد. همچنین به‌دلیل انسداد بخش بزرگتری از سطح مقطع منیفولد، قطره آب به صورت مانع عمل کرده و در پشت قطره آب نیز گردابه کوچکی تشکیل شده است. نیروی وارد شده از گردابه‌ی پشت قطره و همچنین نیروی چسبندگی بر نیروی وزن قطره غلبه کرده و مانع حرکت قطره آب به درون محفظه می‌گردد.



شکل ۱۱ دبی جرمی گذرنده از سلول‌های توده با منیفولد ذوزنقه‌ای شکل



شکل ۱۲ هندسه پیشنهادی برای قسمت انتهایی منیفولد به‌منظور دفع آب مایع از منیفولد

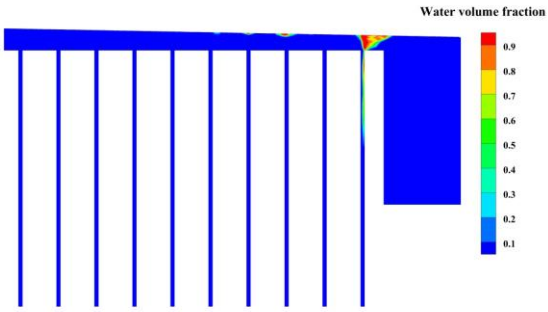


شکل ۱۳ خطوط جریان در انتهای منیفولد با محفظه

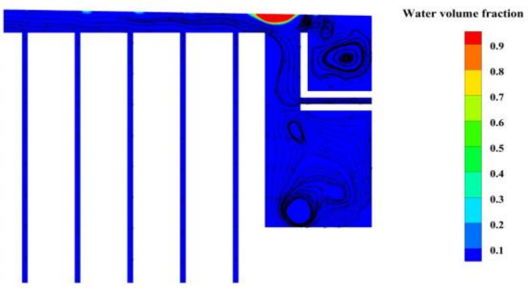
نتایج عددی نشان داد که قطره آب در بالای سلول ۵۲ ساکن باقی می‌ماند. با گذشت زمان و به‌بهم پیوستن قطرات کوچک‌تر، شعاع قطره بزرگ‌تر شده تا زمانی که قطره به ورودی سلول برخورد کند و بخشی از آب مایع جدا شده و به سلول ۵۲ وارد شود. در شکل (۱۴) کسر حجمی آب در زمان ۱۰/۶ ثانیه نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، هندسه پیشنهادی نتوانست مانع ورود آب مایع به سلول انتهایی گردد. با جدایش بخشی از آب مایع و ورود آن به سلول سوختی، از شعاع قطره کاسته می‌شود. با گذشت زمان و چگالش بخارآب در سطح منیفولد، شعاع قطره بزرگ‌تر شده و دوباره به سلول انتهایی برخورد کرده و بخشی از آن وارد سلول انتهایی می‌گردد و این روند در فواصل زمانی مختلف تکرار می‌شود.

برای جلوگیری از ورود آب مایع به سلول سوختی و هدایت آن به درون محفظه، فرض می‌شود که گاز ورودی به منیفولد افزایش یابد. در این مقاله فرض می‌شود گاز ورودی به توده به اندازه یک سلول سوختی افزایش یابد. بدان معنا که گاز مورد نیاز برای ۵۳ سلول سوختی وارد توده گردد. در محفظه یک خروجی تعبیه می‌گردد تا گاز اضافی وارد شده به توده توسط آن تخلیه گردد. با توجه به شکل (۱۲)، گاز مورد نیاز برای واکنش ۵۲ سلول از میان کانال‌های جریان سلول‌های سوختی عبور کرده و پس از واکنش از خروجی $Outlet_{52}$ تخلیه می‌گردد. گاز اضافی که برای یک سلول بوده از خروجی $Outlet_1$ تخلیه می‌گردد. با توجه به اینکه گاز اضافی از کانال‌های جریان عبور نمی‌کند، فشار در ورودی توده افزایش چندانی ندارد و در مقایسه با فشار عملکردی سیستم و افت‌فشار در سلول‌های سوختی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. در شکل (۱۵) کانتور کسر حجمی و خطوط جریان در زمان ۱۰ ثانیه برای هندسه پیشنهادی ترسیم شده است. عبور خطوط جریان از زیر قطره آب و نیروی وارد بر آن موجب می‌گردد تا قطره از بالای سلول‌ها عبور کرده و به سمت محفظه حرکت کند.

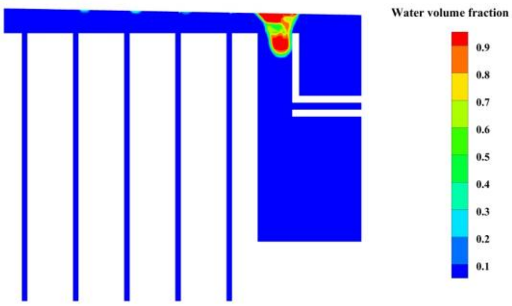
در شکل (۱۶) کانتور کسر حجمی آب مایع در زمان ۱۰/۵ ثانیه نمایش داده شده است. جریان گاز اضافی از خروجی تعبیه شده در بالای محفظه از توده خارج می‌گردد و به دلیل شکل‌گیری گردابه در قسمت انتهایی، قطره آب در بالای محفظه ثابت باقی مانده است. با افزایش شعاع قطره، قطره به ورودی محفظه برخورد می‌کند و باعث جدایش بخشی از قطره و ورود آن به درون محفظه می‌گردد. محل تشکیل قطره در بالای محفظه و محاسبه انتگرال ۲۷ برای سلول ۵۲ بیانگر عدم ورود آب مایع به سلول ۵۲ می‌باشد.



شکل ۱۴ کانتور کسر حجمی در منیفولد با محفظه در زمان ۱۰/۶ ثانیه

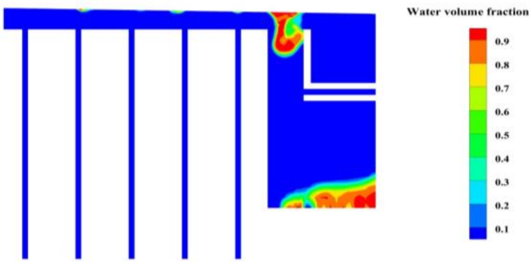


شکل ۱۵ خطوط جریان در انتهای منیفولد برای هندسه نهایی در زمان ۱۰ ثانیه



شکل ۱۶ جدایش قطره آب و ورود به محفظه

ادامه شبیه‌سازی نشان داد که با گذشت زمان ۱/۴ ثانیه از ورود اولین قطره به درون محفظه، با بهم‌پیوستن قطرات کوچک در انتهای توده، شعاع قطره تشکیل‌شده بزرگ‌تر شده و با برخورد با ورودی محفظه به درون آن چکه می‌کند (شکل ۱۷). فرآیند ورود آب مایع به درون محفظه با گذشت زمان ادامه خواهد داشت و هندسه پیشنهادی می‌تواند برای دفع آب مایع از درون منیفولد توده پیل‌سوختی کاربردی باشد.



شکل ۱۷ ورود قطرات بعدی به محفظه

نتیجه گیری

در این مقاله منیفولد بخش کاتد یک توده پیل‌سوختی پلیمری شامل ۵۲ سلول‌سوختی به صورت تکفاز و دوفازی شبیه‌سازی شد تا نقش چگالش آب مایع در توزیع جریان گاز میان سلول‌های سوختی و همچنین راهکار دفع آن از منیفولد توده بررسی گردد. کانال‌های جریان یک پیل‌سوختی در مطالعه قبلی ما [28] شبیه‌سازی گردید و افت‌فشار در یک پیل‌سوختی محاسبه گردیده بود و از مواد متخلخل برای ایجاد افت فشار معادل استفاده گردید. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این مقاله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- شبیه‌سازی تکفاز نشان داد که کاهش تدریجی ارتفاع منیفولد راهکاری مناسب برای بهبود توزیع جریان میان سلول‌های سوختی یک توده می‌باشد. با کاهش ۷۰ درصدی ارتفاع منیفولد با شیب ثابت، ضریب غیریکنواختی و انحراف معیار استاندارد به ترتیب ۸/٤ و ٦/۹ درصد بهبود یافتند.
- شبیه‌سازی دوفازی نشان داد در صورت استفاده از گاز اشباع، بخشی از بخارآب بر روی دیوار بالایی منیفولد دچار چگالش می‌گردد. قطرات بسیار کوچک توسط جریان گاز به سمت انتهای منیفولد هدایت می‌گردند. با تجمع قطرات کوچک، قطراتی با شعاع بزرگ‌تر تشکیل می‌گیرد. در منیفولد مستطیلی، زمانی که وزن قطره از نیروی چسبندگی بیشتر گردد، قطره از منیفولد جدا شده و به سلول‌های سوختی وارد می‌گردد.
- در منیفولد ذوزنقه‌ای، افزایش سرعت جریان و مولفه وزن باعث می‌گردد که سرعت انتقال آب مایع به انتهای منیفولد افزایش یابد. در منیفولد ذوزنقه‌ای، آب مایع در فواصل زمانی کوتاه‌تر و با حجم کم‌تر وارد سلول انتهایی می‌گردد.
- ایجاد یک محفظه در انتهای منیفولد (در جداساز یا صفحه نگهدارنده انتهایی) می‌تواند محلی برای جمع‌آوری آب مایع باشد. نتایج عددی در منیفولد ذوزنقه‌ای نشان داد که آب مایع صرفا به‌دلیل وزن خود نمی‌تواند وارد محفظه گردد. در نتیجه پیشنهاد گردید مقداری به دبی ورودی اضافه گردد. دبی اضافی در ورودی از محفظه تعبیه شده خارج می‌گردد و افت‌فشار در منیفولد تغییرات زیادی نخواهد داشت. عبور جریان اضافی گاز از زیر قطره آب و ورود آن به محفظه موجب می‌گردد که نیروی لازم برای هدایت قطره به درون محفظه تامین گردد.

تقدیر و تشکر

واژه نامه

شماره پیل سوختی در توده	Cell number
پخش کننده جریان	Diffuser
روش شبکه هیدرولیک	Hydraulic Network Approach
بدتوزیعی	Maldistribution
رطوبت زن تخت غشایی	Planar membrane humidifier
استانداردلیتر بر دقیقه	SLPM
توده	Stack
منیفولد ذوزنقه ای	Tapered Manifold
کسر حجمی	Volume fraction

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	سطح مقطع، m^2
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/(kg.K)
D	ضریب پخش، $m^2.s$
F	مجموع نیروهای حجمی، kg/(s.m)
F_1	پارامتر غیریکنواختی جریان
g	شتاب گرانش، m/s^2
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $W/(m^2.K)$
H_{fg}	گرمای نهان تبخیر، J/kg
K	ضریب هدایت حرارتی، W/(m.K)
k_{cond}	ضریب نرخ تقطیر، 1/s
k_{evap}	ضریب نرخ تبخیر، 1/(Pa.s)
M	جرم مولکولی، kg.mol

$\dot{m}$	نرخ تغییر فاز، kg/(m.s)
m_2	ضریب مقاومت اینرسی، 1/m
P	فشار، Pa
$\overline{R}$	ثابت جهانی گازها، J/(K.mol)
T	دما، K
t	زمان، s
U	بردار سرعت، m/s
x	کسر مولی هر جزء از ترکیب
y	کسر جرمی هر جزء از ترکیب

علائم یونانی

α	کسر حجمی
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته، kg/(s.m)
ϑ	ضریب نفوذپذیری، $1/m^2$
σ	ضریب کشش سطحی، kg/s^2
κ	انحنای سطح، 1/m

زیرنویس

1	فاز مایع
2	فاز گاز
g	گاز
c	حالت بحرانی
i	گونه‌ای از ترکیب
sat	اشباع

بالانویس

H_2O	آب

مراجع

1. Barbir, F., "PEM Fuel Cells", Academic Press, (2013).
2. Mench, M.M., "Introduction to Fuel Cells: Fuel Cell Engines, Hoboken", John and Wiley Sons Press, (2008).
3. Yu, X., Zhang, C., Fan, M., Deng, B., Huang, C., Xu, J., Liu, D. and Jiang, S., "Experimental study of dynamic performance of defective cell within a PEMFC stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 13, Pp. 8480–8491, (2022).
4. Wang, J., Yan, J., Yuan, J. and Sundén, B., "On Flow Maldistribution in PEMFC Stacks", *International Journal of Green Energy*, Vol. 8, No. 5, Pp.585–606, (2011).
5. Rashidi, S., Karimi, N., Sunden, B., Kim, K.C., Olabi, A.G. and Mahian, O., "Progress and challenges on the thermal management of electrochemical energy conversion and storage technologies: Fuel cells, electrolysers, and supercapacitors", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 88, Pp. 966-1011, (2022).
6. Guo, H., Zhao, Q. and Ye, F., "An experimental study on gas and liquid two-phase flow in orientated-type flow channels of proton exchange membrane fuel cells by using a side-view method", *Renewable Energy*, Vol. 188, Pp. 603–18, (2022).
7. Huang, H., Liu, M., Li, X., Guo, X., Wang, T., Li, S. and et al., "Numerical simulation and visualization study of a new tapered-slope serpentine flow field in proton exchange membrane fuel cell". *Energy*, Vol. 246, 123406, (2022).
8. Kim, S.Y. and Kim, W.N., "Effect of cathode inlet manifold configuration on performance of 10-cell proton-exchange membrane fuel cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 166, No. 2, Pp. 430-434, (2007).
9. Lebæk J., Bang M. and Kær S.K., "Flow and Pressure Distribution in Fuel Cell Manifolds", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, No. 6, 61001, (2010).
10. Sajid, H.M., Shabani, B. and Cheung, C.P., "Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode

flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 8, Pp. 5272-5283, (2017).

11. Koh, J.H., Seo, H.K., Lee, C.G., Yoo, Y.S., and Lim, H.C., "Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel-cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 115, No. 1, Pp. 54-65, (2003).
12. Park, J. and Li, X., "Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 162, No. 1, Pp. 444-459, (2006).
13. Karimi, G., Baschuk, J.J. and Li, X., "Performance analysis and optimization of PEM fuel cell stacks using flow network approach", *Journal of Power Sources*, Vol. 147, No. 2, Pp. 162-177, (2005).
14. Qin, Y., Liu, G., Chang, Y. and Du, Q., "Modeling and design of PEM fuel cell stack based on a flow network method", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 144, Pp. 411-423, (2018).
15. Mustata, R., Valiño, L., Barreras, F., Gil, M.I. and Lozano, A., "Study of the distribution of air flow in a proton exchange membrane fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 192, No. 1, Pp. 185-189, (2009).
16. Chen, C.H., Jung, S.P. and Yen, S.C., "Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 173, No. 1, Pp. 249-263, (2007).
17. Su, G., Yang, D., Xiao, Q., Dai, H. and Zhang, C., "Effects of vortexes in feed header on air flow distribution of PEMFC stack: CFD simulation and optimization for better uniformity", *Renewable Energy*, Vol. 173, Pp. 498-506, (2021).
18. Jackson, J.M., Hupert, M.L. and Soper, S.A., "Discrete geometry optimization for reducing flow non-uniformity, asymmetry, and parasitic minor loss pressure drops in Z-type configurations of fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 269, Pp. 274-283, (2014).
19. Lim, B.H., Majlan, E.H., Daud, W.R.W., Rosli, M.I. and Husaini, T., "Numerical analysis of flow distribution behavior in a proton exchange membrane fuel cell", *Heliyon*, Vol. 4, No. 10, Pp. 845-856, (2018).
20. Tsukamoto, T., Aoki, T., Kanesaka, H., Taniguchi, T., Takayama, T., Motegi, H. and et al., "Three-dimensional numerical simulation of full-scale proton exchange membrane fuel cells at high current densities", *Journal of Power Sources*, Vol. 488, 229412, (2021).
21. Chen, X., Fang, Y., Liu, Q., He, L., Zhao, Y., Huang, T and et al., "Temperature and voltage dynamic control of PEMFC Stack using MPC method", *Energy Reports*, Vol. 8, Pp. 798-808, (2022).
22. Yan, W.M., Lee, C.Y., Li, C.H., Li, W.K. and Rashidi, S., "Study on heat and mass transfer of a planar membrane humidifier for PEM fuel cell", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 152, 1195388, (2020).
23. Wilberforce, T., Ijaodola, O., Khatib, F.N., Ogungbemi, E.O., El-Hassan, Z., Thompson, J. and et al., "Effect of humidification of reactive gases on the performance of a proton exchange membrane fuel cell". *Science of the Total Environment*, Vol. 688, Pp. 1016-1035, (2019).
24. Lebæk, J., Andreasen, M.B., Andresen, H.A., Bang, M. and Kær, S.K., "Particle Image Velocimetry and Computational Fluid Dynamics Analysis of Fuel Cell Manifold", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, No. 3, 31001, (2010).
25. Chen, W.H., Tsai, Z.L., Chang, M.H., You, S. and Kuo, P.C., "Geometry optimization and pressure

analysis of a proton exchange membrane fuel cell stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 31, Pp. 16717-16733, (2021).

26. Huang, F., Qiu, D., Lan, S., Yi, P. and Peng, L., "Performance evaluation of commercial-size proton exchange membrane fuel cell stacks considering air flow distribution in the manifold", *Energy Conversion and Management*, Vol. 203, 112256, (2020).
27. Brackbill, J., Kothe, D. and Zemach, C., "A continuum method for modeling surface tension", *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, Pp. 335-354, (1992).
28. Sangtabi, A.R., Kianifar, A. and Alizadeh, E., "Effect of water vapor condensation on the flow distribution in a PEM fuel cell stack", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 151, 119471, (2020).
29. Ryu, J.B., Jung, C.Y. and Yi, S.C., "Three-dimensional simulation of humid-air dryer using computational fluid dynamics", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, No. 4, Pp. 1092-1098, (2013).
30. Famileh, I.Z., Esfahani, J.A. and Vafai, K., "Effect of nanoparticles on condensation of humid air in vertical channels", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 112, Pp. 470-483, (2017).
31. Jithesh, P.K., Bansode, A.S., Sundararajan, T. and Das S.K., "The effect of flow distributors on the liquid water distribution and performance of a PEM fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 22, Pp. 17158-17171, (2012).
32. Hirt, C. and Nichols, B., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, Vol. 1, Pp. 201-225, (1981).
33. Samkhaniani, N. and Ansari, M.R., "Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 89, Pp. 120-131, (2016).
34. Marschall, H., Hinterberger, K., Schüler, C., Habla, F. and Hinrichsen, O., "Numerical simulation of species transfer across fluid interfaces in free-surface flows using OpenFOAM", *Chemical Engineering Science*, Vol. 78, Pp. 111-127, (2012).
35. Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D. and Bailey, M.B., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John and Wiley Sons Press, (2014).
36. Borgnakke, C. and Sonntag, R.E., "Fundementals of Thermodynamics", John and Wiley Sons Press, (2009).
37. Ding, Y., Bi, H.T. and Wilkinson, D. P., "Three dimensional numerical simulation of gas–liquid two-phase flow patterns in a polymer–electrolyte membrane fuel cells gas flow channel", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 15, Pp. 6284-6292, (2011).
38. Kim, J.H., Kim, W.T., "Numerical Investigation of Gas-Liquid Two-Phase Flow inside PEMFC Gas Channels with Rectangular and Trapezoidal Cross Sections", *Energies*, Vol. 11, No. 6; pp. 1403, (2018).
39. Maharudrayya, S., Jayanti, S. and Deshpande, A.P., "Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 144, No. 1, Pp. 94-106, (2005).